E/CONF.39/A/8
25 Sept.1962
ORIGINAL : FRANCAIS

CONFÉRENCE DES NATIONS UNIES
SUR L'APPLICATION DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNIQUE
DANS L'INTÉRÊT DES RÉGIONS PEU DÉVELOPPÉES

Point de l'ordre du jour : A. 3. 3. 3

Belgique

EMMAGASINEMENT SOUTERRAIN ET RECONSTITUTION DES NAPPES D'EAU SOUTERRAINES

Par L.J. TISON,
Professeur à l'Université de Gand
Secrétaire général de l'Association
Internationale d'Hydrologie Scientifique

Les mémoires rédigés à l'intention de la Conférence des Nations Unies sur l'application de la science et de la technique dans l'intérêt des régions peu développées sont des documents de travail. Ils sont publiés tels qu'ils ont été présentés et les assertions et opinions qu'ils contiennent sont celles de leurs auteurs.

NOTES

1. Les mémoires choisis pour être présentés en séance générale pourront être obtenus à la Conférence dans les langues officielles suivantes des Nations Unies: anglais, espagnol, français et russe.

2. Les mémoires choisis pour être présentés en séance spéciale pourront être obtenus à la Conférence dans l'une seulement de ces langues officielles.

3. Les résumés qui ont été rédigés pour tous les mémoires par les auteurs de ceux-ci pourront être obtenus à la Conférence dans les langues officielles suivantes des Nations Unies: anglais, espagnol, français et russe.

4. Préalablement à la Conférence, les mémoires et les résumés ne feront pas l'objet d'une distribution générale mais d'un tirage restreint destiné aux délégations des gouvernements et autres participants officiels. La publication et la distribution générale des actes de la Conférence s'effectueront conformément aux règles et pratiques agréées par le Comité des publications des Nations Unies.

EMMAGASINEMENT SOUTERRAIN ET RECONSTITUTION DES NAPPES D'EAU SOUTERRAINES

par L.J. TISON, Professeur à l'Université de Gand
Secrétaire Général de l'Association Internationale d'Hydrologie Scientifique.

--oOo--

1. Introduction.-

L'exploitation de plus en plus généralisée et profonde des nappes aquifères dans les pays à civilisation ancienne a conduit les ingénieurs et hydrologues à des recherches et à des essais pour arriver à emmagasiner souterrainement des eaux de surface et pour reconstituer des nappes ayant tendance à s'épuiser, du fait de leur exploitation intensive. Dans les pays neufs, le problème se pose bien souvent de façon plus dramatique du fait de l'insuffisance des ressources en eau souterraine pour arriver à une mise en exploitation suffisante de l'agriculture, de l'industrie du pays et même pour leur donner une hygiène suffisante.

L'évaporation généralement très réduite caractérisant l'emmagasinement souterrain lui donne sur les réservoirs de surface un avantage particulièrement marqué là où cette évaporation peut porter sur des fractions non négligeables des masses d'eau emmagasinées, ce qui est précisément souvent le cas pour les pays en zones arides ou semi-arides D'autre part, les sites pour la construction de barrages réservoirs peuvent être rares dans certains régions et la sédimentation peut en réduire rapidement la capacité utile. Par contre, la disposition géologique d'une région peut offrir des couches perméables disposées de façon à offrir de larges possibilités d'emmagasinement souterrain d'eau.

2. Antécédents.-

L'idée d'une régulation dans le soutirage des eaux souterraines est d'ailleurs assez ancienne et bien des captages de l'Europe de l'Ouest, construits il y a près de cent ans, possèdent des galeries avec "serrements".

Ces serrements établis à la traversée d'une couche peu ou pas perméable permettent d'isoler par leur fermeture les parties des galeries à l'amont des serrements, de sorte que dans les massifs alimentant ces parties isolées, la nappe tend à reprendre son état naturel d'avant le captage, réalisant des réserves que l'ouverture des serrements rendra disponible à volonté. Il s'agit là d'un cas assez particulier plutôt cité à titre historique. Il y a simplement dans ce cas régularisation des apports naturels pour les adapter à la consommation.

3. Reconstitution des nappes.

3.1 - Solutions possibles. - Le problème s'est évidemment élargi et il a fallu non seulement régulariser les ressources mais les augmenter par des moyens artificiels. On a pu envisager une reconstitution directe des nappes en les alimentant par des eaux de surface qu'on amène soit à recouvrir des champs d'épandage, soit à s'infiltrer dans les rigoles, soit à se perdre dans les puits absorbants. Et à côté de cette réalimentation directe, on a considéré une reconstitution indirecte (ou induite comme l'ont appelée les Américains) en créant des dispositifs qui captent non seulement l'eau propre de la nappe, mais en provoquant son rabattement, amènent l'eau de rivières ou de lacs voisins à pénétrer dans la nappe et à assurer sa réalimentation continue.

3.2 - Recharge indirecte. - Cette recharge indirecte est utilisée par la plupart des installations de captage établies dans les sédiments (sables et graviers) de plaines alluviales à proximité plus ou moins grande de la rivière suivant le degré de perméabilité, à l'aide de puits ou de galeries.
La méthode est ancienne et ces captages constituent une des sources les plus abondantes et souvent les plus économiques. Cette aisance d'obtention d'une eau souvent propre à de multiples usages jointe à la navigabilité de la rivière toute proche a souvent attiré l'implantation de concentrations industrielles puissantes (Rhin, Meuse, Ohio)
Les débits que peuvent donner ces captages dépendent de la perméabilité, de la distance de la rivière et de la possibilité d'existence de dépôts dans le lit de la rivière, dépôts qui pourraient créer un obstacle à la filtration. Le balayage de ces dépôts par les crues est un élément favorable. Souvent les diverses couches constituant le plaine alluviale n'ont pas la même perméabilité et il arrive fréquemment que les couches inférieures, déposées par une rivière plus rapide, donnent de meilleurs débits que celles du dessus. La qualité de l'eau est évidemment influencée par celle de la rivière, l'eau pompée étant un mélange de cette dernière avec les eaux souterraines alimentant aussi les dépôts de la plaine alluviale. La méthode comme on l'a vu est ancienne, mais elle a encore attiré l'attention dans les derniers temps par l'utilisation de puits à drains horizontaux dont les branchements peuvent même s'étendre sous la rivière, donnant des possibilités de débits considérables et de qualités variant quasi à volonté par la manoeuvre d'admission des différents drains dont les eaux sont ou bien en provenance quasi directe de la rivière ou bien s'enfoncent dans la nappe initiale.

3.3. - Recharge directe.

3.3.1 - Principes

La recharge directe peut être d'application plus générale. Dans la reconstitution directe des nappes, la recharge peut d'ailleurs se faire de multiples façons qui donnent lieu à autant de systèmes différents. Il y a de toute façon toujours une infiltration d'eau, en général superficielle; mais cette infiltration peut se faire par un épandage analogue à une inondation (flooding) par des ravines et tranchées, à l'aide de bassins, en aménagement le lit de cours d'eau, par des puits absorbants, par des fouilles plus ou moins profondes.

Le tableau ci-après, emprunté à Mullnix, donne une idée de la répartition de ces divers procédés, fin 1957, dans une des régions du monde où la recharge a été largement appliquée, la Californie.

Méthode	Pourcentage sur l'ensemble des réalisations.	Pourcentage du volume d'eau épanchée en 46 ans.
Bassins	54	45
Modification du lit	15	37
Tranchées	8	17
Puits absorbants	12	1
Dépressions	7	1
Epandage (flooding)	4	1

3.3.2. - Infiltration et Percolation.

A la base de ces méthodes directes se trouvent évidemment les possibilités d'infiltration, à l'entrée de l'eau dans la couche supérieure du sol et de percolation, à travers les couches sous-jacentes jusqu'à la nappe. Infiltration et percolation interviennent toutes deux pour influencer la recharge. Le taux d'infiltration est par définition la vitesse de l'eau pénétrant dans le sol et il s'exprime en centimètres par jour (ou en pieds par jour).

On a parfois essayé d'établir une relation entre la texture du sol et le taux d'infiltration et c'est ainsi que Richter estime que les sols à texture grossière donnent des taux d'infiltration compris entre 1,6 et 10 pieds par jour avec une moyenne de 4,2. Pour les textures moyennes, le taux d'infiltration varie de 1,7 à 3,6 pieds par jour, avec une moyenne de 2,2 tandis que les sols à texture fine donnent moins de 1,0 pied par jour avec une moyenne de 0,46. Il faut cependant éviter de donner à semblable relation une valeur trop absolue ; d'autres éléments que la texture peuvent intervenir comme on le verra : par exemple, le couvert végétal, la stabilité de la structure, la présence de matières en suspension dans l'eau, etc.

Il n'en est pas moins vrai qu'il y a tout avantage à choisir des terrains de recharge à texture grossière et à ce point de vue, les cônes de déjection qui se sont formés aux débouchés dans les vallées larges des affluents plus ou moins torrentiels du cours d'eau principal, constituent souvent des endroits d'élection pour l'établissement de recharge, les terrains de captage se plaçant à l'aval des zones où se fait l'enrichissement.

En dépit de ces choix, qui ne sont d'ailleurs pas toujours possibles, la nécessité de traitements tant pour le sol que pour l'eau se manifestera dans bien des circonstances.
Une étude du sol surtout au point de vue de la perméabilité des couches constituantes ainsi que pour se rendre compte de la capacité d'emmagasinement offerte par la couche à recharger est par conséquent d'absolue nécessité pour l'établissement de projets de recharge. Des sondages avec examen d'échantillons non remaniés en laboratoire, permettront de repérer l'extension des couches de faible perméabilité et les volumes offerts à la recharge à l'aide de coupes longitudinales et transversales. L'étude du sol doit aller de pair avec celle de l'eau de recharge dont on doit connaître les variations de teneurs en sédiments et les propriétés physiques et chimiques.

3.3.3. - Traitements du sol et de l'eau pouvant accroître la vitesse de recharge.

L'accroissement de cette vitesse de filtration a pour effet de permettre une réduction de la surface d'infiltration et par suite de l'étendue enlevée à la culture.

3.3.3.1. - Si le sol possède à la fois de bonnes qualités d'infiltration et de percolation, (cas des cônes de débris signalés ci-dessus), le problème consistera surtout à lui garder ces précieuses propriétés en empêchant son colmatage. Dans ce cas c'est donc sur les eaux qu'il faudra porter son attention. Les eaux chargées de sédiments en suspension devront donc pouvoir être déviées par des by-pass.Une certaine teneur de matières en suspension peut cependant être tolérée lorsque la surface d'épandage ou le bassin sont "protégés" par une végétation assez dense (Bermuda grass des Américains, par exemple). Dans pareils cas, des teneurs de matières en suspension atteignant jusque 600 p.p.m. ont pu être tolérées pendant de courtes périodes. Les couvertures herbeuses ont quasi quadruplé le taux d'infiltration pour une durée supérieure à 5 ans.

Des bassins, des fossés, ou l'épandage en surface pourront être utilisés avec ces sols favorables tant à l'infiltration qu'à la percolation en profondeur. Les bassins sont réalisés par la construction de diguettes en matériaux non érodibles (des fragments de roches maintenus par des fils de fer tissés, par exemple). La hauteur de ces diguettes est suffisante pour assurer la couverture du sol par l'eau d'une diguette jusqu'au pied de celle qui se trouve plus à l'amont. L'alimentation se fait par le ou les bassins d'amont, l'eau passant d'un bassin à l'autre par déversement sur les diguettes. Lorsque l'on utilise des fossés ou petits canaux pour l'infiltration de l'eau, on leur donne peu de profondeur, un fond plat et une entredistance assez faible. Leur tracé dépend de la topographie du terrain et leur pente doit empêcher tant le dépôt de matériaux que l'érosion du sol.

L'inconvénient du procédé par canaux ou fossés d'infiltration est de réduire la surface d'infiltration à 10 ou 12 % de la surface totale des terrains utilisés, alors que dans la méthode par bassin ce pourcentage est de 75 à 80 %. Cette méthode par bassins est d'application particulièrement aisée dans les plaines alluviales. Elle peut d'ailleurs s'étendre à des lits abandonnés et s'appliquer concurremment avec l'infiltration provenant du lit de la rivière.

Enfin, dans la méthode par épandage en surface (flooding), on fait passer l'eau sous faible épaisseur sur toute l'étendue réservée à l'infiltration, en assurant un contrôle suffisant pour que l'écoulement ne se concentre pas en des endroits privilègiés par érosion du sol. Cette érosion doit être évitée à tout prix afin de laisser à la surface du sol sa texture primitive.

Si les eaux utilisées pour la recharge sont toujours quelque peu chargées, on pourra les obliger à une certaine sédimentation dans des bassins spécialement réservés à cet usage à l'amont de la zone d'épandage. On pourra d'ailleurs y ajouter des substances floculantes. Cette préparation peut d'ailleurs s'appliquer si on utilise d'autres procédés de recharge comme les puits d'infiltration ou les fouilles.

3.3.3.2. - Lorsque le sol possède une bonne capacité de percolation mais que sa surface ne permet qu'une infiltration trop réduite, il y a lieu d'améliorer les caractéristiques de l'eau et de la surface du sol, tout en utilisant certaines pratiques d'exploitation. De nombreuses recherches en Californie ont montré que l'infiltration peut être notablement augmentée (quatre fois et plus) et stabilisée en incorporant à la couche supérieure (sur 5 cm environ) des substances organiques.

De très heureux résultats ont notamment été obtenus en utilisant des déchets de plantations de coton (tiges, feuilles, semences, des restes de fibres - cotton gin trash des Américains).

Les essais montrent que ces substances produisent leur action maximum lorsque le sol traité est submergé pendant 8 semaines. Leur influence n'est pas complètement élucidée, mais il semble bien qu'elle s'explique par une action microbienne améliorant la texture du sol, superficiel. L'action favorable d'une couverture par une végétation herbeuse a été signalée. Certains produits chimiques produisent une action du même genre (voir Schiff). On notera aussi que tout ce qui rend le sol plus compact, réduit l'infiltration : ceci est particulièrement à prendre en considération dans les travaux d'aménagement et d'entretien. On a également essayé de traiter l'eau amenée en y ajoutant du gypse ou de l'acide sulfurique. L'amélioration ne fut pas significative. Par contre des additions de sulfate ferrique ont donné de meilleurs résultats.

3.3.3.3. - Il reste une troisième éventualité : l'infiltration est bonne, mais la percolation est insuffisante. Les résultats donnés par l'étude des sols sont particulièrement importants dans ce cas, pour déceler les horizons causes de la mauvaise percolation. L'emploi de méthodes d'injection utilisant des fouilles ouvertes, des tranchées plus ou moins profondes, peuvent donner de sérieuses améliorations en éliminant les couches hydrauliquement résistantes et en augmentant la charge par l'eau de remplissage de la dépression créée. On a essayé de remplir ces fouilles ou d'en recouvrir le fond et les parois de matériaux graveleux constituant des filtres. (voir paragraphe 3.3.6) D'autre part, dans ce cas, de véritables puits et notamment des puits tubés, perforés latéralement peuvent être utilisée comme puits absorbants. Quel que soit le système utilisé, si l'eau disponible pour la recharge est chargée de sédiments, il faudra évidemment la soumettre à une décantation, dans des bassins et même l'accélérer par l'ajoute de floculants comme on l'a déjà signalé plus haut.

Un des inconvénients de l'emploi de s puits absorbants est la réduction de leur faculté d'absorption avec le temps, non seulement sous l'action du colmatage dont il vient d'être question, mais plus encore par suite de la formation de pellicules ou films, vraisemblablement dus aux algues ou aux bactéries. On a pu remédier à cet inconvénient en stérilisant l'eau de recharge à l'aide de sulfate de cuivre, d'hypochloride de calcium , de "chlorine" etc. On a aussi pu rétablir le pouvoir absorbant de ces puits en inversant leur mode d'action et en les transformant temporairement en puits ordinaires dont on tire un certain débit, soit encore en les entourant de gravier dans lequel on injecte de l'eau sous pression par un tube perforé placé à l'extérieur du puits de recharge.

A remarquer encore que les formules simples déduites de la loi de Darcy (et de l'hypothèse de Dupuit) peuvent donner des indications quantatives si l'étude préparatoire du terrain et notamment la détermination de son coefficient de perméabilité a été préalablement faite en laboratoire.

On peut encore observer que dans le cas présent (taux de percolation profonde insuffisant), si on est obligé par une raison ou l'autre de ne pas utiliser des dispositifs profonds (puits ou cavités naturelles ou non), il est indiqué de limiter l'infiltration à une partie de la surface, par exemple à des bandes de terrain ou à des fossés; ainsi l'espace entre ces bandes reste utilisable pour la culture.

On signalera enfin que même des nappes captives ont pu être rechargées à l'aide de puits traversant les couches imperméables du toit pour déboucher dans la couche porteuse perméable.

3.3.4. - Pratiques opérationnelles:-

Il a été question au paragraphe 3.3.3.2. de certaines pratiques d'opérations qui peuvent améliorer l'infiltration. Il a été notamment observé que l'assèchement des surfaces d'épandage, fossés, bassins, etc. leur permet de retrouver leur capacité d'infiltration, surtout si les sols en question contiennent des matières organiques. Il en résulte que par des alternatives de fonctionnement et de repos sans immersion ces surfaces présenteront toujours des taux d'infiltration élevés. La longueur optima des pauses doit se déterminer par l'usage. Un système de ce type a notamment été indiqué par Schiff.

3.3.5. - Procédés pour améliorer le taux d'infiltration.-

On a dit un mot de la possibilité d'augmenter le taux d'infiltration, à l'aide de filtres. Schiff et Suter ont fait des essais dans ce sens. Les résultats de Schiff montrent qu'on peut au moins doubler le taux d'infiltration en repandant à la surface d'infiltration du sable tamisé dont les grains ont de 0,5 à 1 mm de diamètre. Des grains de gravier de 3 à 6 mm lui ont par contre donné peu d'amélioration, tandis que des débris de roches aux angles vifs ayant ces dernieres dimensions avaient une action comparable à celle des sables cités. Suter à Peoria a cependant obtenu des résultats intéressants avec des graviers aux éléments aussi volumineux. Ces résultats justifient des réalisations avec puits remplis de gravier établis au fond de tranchées et alimentés par des drains eux-mêmes recouverts de gravier également au fond de tranchées.

3.3.6. - Quelques constatations.-

Le taux de recharge n'est pas influencé par la profondeur à laquelle se trouve la surface de la nappe, sauf évidemment lorsque cette nappe affleure. Il y a donc intérêt à choisir pour la recharge, des nappes profondes. Il a été constaté que la hausse de la température de l'eau augmente le taux d'infiltration. Il fallait s'y attendre : tant l'infiltration que la percolation, sont réglées par la loi de Darcy : d'après celle-ci, la vitesse d'infiltration ou de percolation est proportionnelle au coefficient de perméabilité qui est lui-même influencé par la viscosité de l'eau, fonction à son tour de la température.

3.3.7. - Recharge par l'irrigation.-

Les eaux d'irrigation ne sont évidemment pas utilisées complètement par la végétation. Une partie de ces eaux percole vers la nappe et la recharge. Dans certaines régions, le gonflement de la nappe dû à l'irrigation peut atteindre des proportions réellement considérables. C'est ainsi que Nace signale notamment l'exemple de la Snake River Plain de l'Idaho. Sur la rive Sud de la rivière, vers Tivin Falls, la nappe s'y trouvait, à l'origine à grande profondeur, mais les irrigations sur une surface de plus de 80.000 Ha ont fait monter son niveau de 70 à 100 m et plus, en 25 ans, l'emmagasinement portant sur plusieurs centaines de millions de m3.
Des applications de ce genre méritent un intérêt tout particulier. Certaines cultures (luzerne, coton) supportent une irrigation surabondante. De plus , l'irrigation pourrait être continuée, quasi sans dépenses nouvelles, au cours des mois sans culture. On peut arriver de cette façon à une recharge qui serait un "sous-produit" très intéressant de l'irrigation.

3.3.8. - Influence de la recharge sur la salinité et sur la qualité des eaux.-

Il est évident que si les sols de surface sont salins, soit naturellement, soit par suite d'irrigations prolongés, l'infiltration entraînera petit à petit ces sels qui finiront par atteindre la nappe.

C'est ce que montrent certaines régions de Californie ou d'autres zones plus ou moins arides. Le phénomène est à étudier sérieusement, la recharge pouvant dans ce cas éviter les sels de la surface si on utilise des puits ou des fouilles pour l'absorption. Si les prélèvements à faire dans la nappe rechargée doivent donner de l'eau potable, il est aussi nécessaire de s'occuper de l'aspect bactériologique du problème. Jansa estime que la distance de filtration de l'eau rechargée (entre le point de recharge et l'endroit du captage) doit être de l'ordre de 250 m, cette distance pouvant être réduite à 150 m s'il s'agit de sables fins. Certains essais effectués par l'auteur en Belgique lui donnent à penser que cette distance ne peut guère être réduite.

3.3.9. - Economie du procédé.-

On se rend compte que le prix de revient de l'emmagasinement sera toujours un cas d'espèce. Il est un "sous-produit" à prix de revient minimum dans le cas des nappes rechargées par l'irrigation ou par des eaux dont on ne peut se débarrasser que par infiltration. Mille circonstances exerceront leur influence sur ce prix de revient dans les conditions habituelles.(installations nécessaires, valeur des terrains, etc.) On a cité un prix de 5 $ par acre-foot (1200 m3 environ) pouvant tomber à 3 $ pour les installations à grand rendement (Loverty).

3.4 - Recharge - Barrière contre les intrusions d'eaux salines et surtout d'eau de mer. On sait que du fait de sa plus grande densité, l'eau de mer s'infiltre en coin sous les eaux douces dans les nappes des régions côtières. L'interface lorsque les nappes sont au repos, se situe sensiblement à une profondeur égale à 40 fois l'altitude de nappe d'eau douce au-dessus du niveau de la mer. Mais lorsque l'on pompe cette eau douce (l'eau des dunes par exemple), la dépression produite par le pompage relève le niveau de l'eau salée dans la direction des puits, la rendant impropre à l'usage si les pompages sont intensifs. On a imaginé de relever artificiellement la charge de l'eau douce par recharge entre la mer et les captages, chassant par le fait même l'eau salée et constituant une barrière contre son intrusion.

3.5. - Il en peut être question dans ces quelques pages d'épuiser le sujet, qui a d'ailleurs provoqué l'éclosion d'une littérature très vaste. Une très heureuse bibliographie annotée fait l'objet du Water Supply Paper 1477 du Geological Survey par le Prof. David Todd. C'est un travail avec des centaines de références, qu'on peut considérer comme complet pour tout ce qui a été publié jusque fin 1954. Pour la littérature plus récente on consultera particulièrement :

Mullnix L.A. - The interest of the Dept. of Water Ressources in artificial recharge - Proc.Conference on Ground Water Recharge 1959.

Richter R.C. - Geologic consideration on artificial recharge - Bull. Geol. Soc. Amer. 56, 1661 , 1955.

Schiff Léonard - The Darcy Law in the selection of water spreading systems for ground water replenishment. Publ. 41 - Assoc. Intern. Hydr. Scient. 1956.

Schiff Léonard- The use of filters to maintain high infiltrations rates in aquifers for ground water Recharge - Publ. 44 Assoc. Intern. Hydr. Scient.

35 F - Oct.1962 - 1,000